

Salvatore Manfreda, Leonardo Mancusi*

PREVISIONE IDROLOGICA PER LA PRODUZIONE IDROELETTRICA

HYDROLOGICAL PREDICTION FOR HYDROPOWER PRODUCTION

Il presente articolo descrive un modello idrologico mirato alla previsione idrologica per gli impianti di produzione idroelettrica. La struttura del modello incorpora processi fisicamente basati consentendo una nuova strategia di calibrazione. La procedura di calibrazione è composta di tre fasi definite in accordo con i processi simulati: i) calibrazione dei parametri del modulo di scioglimento nivale utilizzando la copertura nevosa ottenuta da immagini satellitari; ii) stima della componente di base del deflusso mediante un filtro matematico; iii) calibrazione dei parametri che controllano il deflusso superficiale per mezzo delle serie storiche del deflusso fluviale depurata del deflusso di base. Questo consente di fornire, utilizzando le previsioni meteorologiche, una previsione attendibile del deflusso fluviale con 1-3 giorni di anticipo. La previsione del deflusso, utile in generale nella gestione delle risorse idriche e per la difesa contro gli eventi calamitosi è anche un'informazione molto importante per il mercato elettrico. La sua previsione, infatti, fornisce dati di notevole interesse per i partecipanti al mercato elettrico che vendono ed acquistano elettricità per ciascuna delle 24 ore del giorno seguente. Il modello proposto è stato utilizzato nel bacino dell'Aniene per generare previsioni deterministiche partendo da previsioni meteo del modello COSMO-LAMI. Le analisi sono state utilizzate per effettuare previsioni con 1, 2 e 3 giorni di anticipo. I risultati mostrano un ottimo livello di prestazione per la previsione ad 1 giorno mentre l'errore cresce più marcatamente per le previsioni a 2 e 3 giorni.

Parole chiave: Modellazione idrologica, Calibrazione dei modelli, Previsione idrologica, Impianti idroelettrici.

The present paper describes a hydrological model aimed at improving prediction systems for a hydropower production plant. A significant merit of the work lies in the model structure that incorporates physically based processes allowing a new calibration strategy. In fact, calibration procedure is three phases according to the simulated processes: i) parameters of snowmelt module are calibrated using the snow coverage obtained by satellite images, ii) baseflow is identified using a mathematical filter, iii) this allow the calibration of the parameters controlling surface runoff with the time series of surface runoff. This allows the definition of a reliable model structure able to provide good estimates of the streamflow. The runoff forecast is generally useful in water resources and flood risk management, but is also very important for the electricity market. In fact, its prediction provides information of great interest to the participants of the electricity market, selling and buying electricity for each of the 24 hours of the following day. Model is used on the Aniene river basin generating deterministic forecast obtained from COSMO-LAMI. Analyses have been used to make prediction with 1, 2 and 3 days in advance. Results show a good level of the performances of the forecast with 1 day in advance while errors increase more markedly at 2 and 3 days. Model may represent a useful tool for power production optimization in hydropower plants.

Keywords: Hydrological Modelling, Model Calibration, Hydrological Prediction, Hydropower Plants.

1. INTRODUZIONE

L'energia idroelettrica rappresenta circa il 18% della produzione nazionale di energia elettrica ed il 66% fra quelle rinnovabili (TERNA, 2010). Una parte di questa energia, cioè quella derivante da impianti a serbatoio ed a bacino, e che nel 2010 è stata pari al 57% della produzione idroelettrica totale, è strategica per soddisfare i picchi di richiesta. Gli impianti ad acqua fluente, invece (come gli impianti eolici e solari), hanno in generale la caratteristica di non essere programmabili, cioè non è possibile modulare la produzione di energia in funzione della domanda.

L'Italia dovrà raggiungere entro il 2020 l'obiettivo del 17%

sulla quota di copertura dei consumi finali (riferita a elettricità, calore e trasporti) mediante energia rinnovabile, come imposto dalla Direttiva 2009/28/CE. L'obiettivo specifico, riferito allo sviluppo atteso delle fonti rinnovabili per il settore elettrico, è del 26,39% entro il 2020 secondo quanto riportato nel Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili del 30 giugno 2010. La necessità di raggiungere questi obiettivi comunitari di riduzione dei gas serra, ha prodotto lo sviluppo molto rapido della capacità di produzione di impianti non programmabili oggetto di incentivazione (Montanino et al., 2010). Questo potrebbe causare una pluralità di impatti rilevanti per la gestione in sicurezza del si-

* Salvatore Manfreda, Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, e-mail: salvatore.manfreda@unibas.it; Leonardo Mancusi, Dipartimento Ambiente e Sviluppo Sostenibile, Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A., e-mail: leonardo.mancusi@rse-web.it.

stema elettrico e per i costi connessi alla sua gestione (PAS 21/11 dell'Autorità dell'Energia Elettrica e il Gas - AEEG). Per tutti questi impianti, la non programmabilità non implica tuttavia l'impossibilità di prevedere l'energia elettrica prodotta ed immessa in rete, e per tale motivo che in una recente delibera dell'AEEG (delibera 5 luglio 2012 n. 281/2012/R/EFR) è stata emanata una prima disciplina per promuovere migliori previsioni sull'energia elettrica da fonti rinnovabili immessa in rete ed evitare che i costi di mancate previsioni o di programmi effettuati con scarsa affidabilità continuino a pesare solo sulla generalità dei consumatori.

Considerando l'attuale importanza dell'energia idroelettrica nell'ambito delle fonti rinnovabili e che, secondo la programmazione al 2020 comunque continuerà a rappresentare oltre il 42% (fonte GSE) di quelle rinnovabili, si comprende l'importanza della previsione di tale produzione. A questo va anche aggiunto che la gran parte delle nuove installazioni idroelettriche è legata ad impianti ad acqua fluente.

Il sistema elettrico nazionale è un sistema a rete con vincoli tecnici molto stringenti, tra i quali quello del bilanciamento istantaneo fra energia immessa e prelevata. Pertanto, in un contesto di libero mercato dell'energia, la programmazione delle unità di produzione e di consumo effettuata nel Mercato dell'Energia il giorno prima è fondamentale per il funzionamento del sistema. In questo contesto, la corretta previsione in anticipo della produzione di energie rinnovabili è molto importante per facilitare l'attività di Bilanciamento del sistema in tempo reale. Considerando la tempistica del Mercato Elettrico, nel quale la maggior parte delle offerte di compravendita di energia elettrica vengono presentate entro le 9.15 del giorno precedente il giorno di consegna si comprende che le previsioni di produzione devono avere un tempo di preavviso di almeno due giorni.

Nel caso degli impianti idroelettrici ad acqua fluente la previsione del deflusso con questo anticipo è possibile, utilizzando unicamente dati di osservazioni di livelli e precipitazioni, solo nel caso di pochi grandi corsi d'acqua per i quali i tempi di corrivazione sono maggiori di due giorni. Nella maggior parte dei casi, in Italia, i corsi d'acqua nelle sezioni in cui sono presenti delle installazioni hanno tempi di corrivazione notevolmente inferiori e quindi è essenziale che la previsione venga effettuata mediante l'utilizzo di modelli idrologici in cascata con modelli meteorologici di previsione delle precipitazioni con adeguato anticipo.

Fra i modelli meteorologici si distinguono quelli a scala globale che simulano l'intero globo terrestre e quelli ad alta risoluzione detti ad Area Limitata che simulano con maggior dettaglio un'area più ristretta. Questi ultimi meglio si adattano all'accoppiamento con i modelli idrologici e per essere operativi devono girare almeno una volta al giorno usando, per definire le condizioni al contorno, i campi prodotti dai modelli globali.

Nel presente lavoro, le previsioni del modello meteorologico sono fornite in input ad un modello idrologico a parametri concentrati (AD2 - *Manfreda e Fiorentino*, 2004) al fine di produrre previsioni delle portate ordinarie e di piena a 24-48-72 ore. I dati meteorologici sono utilizzati come

media, pesata con l'area di sovrapposizione, dei valori della griglia di calcolo del modello meteorologico ricadenti all'interno del bacino idrografico. Data la scala del bacino idrografico considerato (con un'area di circa 690 km²) ed essendo la finalità del lavoro quella di quantificare la risorsa disponibile piuttosto che prevedere le piene non è stata operata una disaggregazione spaziale e temporale dei dati meteorologici. Le problematiche associate alla differenza di scala, infatti, diventano cruciali per la previsione di eventi di piena (*Ferraris et al.* 2002).

2. IL CASO STUDIO

L'approccio modellistico è stato applicato al bacino idrografico del Fiume Aniene (uno degli affluenti principali del fiume Tevere) a monte della diga di San Giovanni (Tivoli). Le caratteristiche principali di questa parte di bacino sono: superficie di 690 km², range di altitudine da 213 a 2156 m s.l.m. (altitudine media di 800 m s.l.m.) e latitudine media di 41.57°.

A partire dal 1884, questo corso d'acqua è stato utilizzato per la produzione di energia elettrica. Gli impianti idroelettrici realizzati lungo il corso fluviale sono caratterizzati da una modesta capacità d'invaso (con volume di accumulo compreso tra 0.03 Mm³ e 0.19 Mm³) e con una regolazione giornaliera. In totale sono presenti sette impianti ad acqua fluente con una potenza installata totale di 84 MW ed una produzione media annua di circa 300 GWh. Solo cinque impianti sono dotati di una piccola capacità d'invaso il cui totale ammonta a circa 0.77 Mm³ che equivale a circa 15 ore del deflusso medio del Fiume Aniene.

All'interno del bacino sono presenti 9 stazioni di monitoraggio del Servizio Idrografico di Roma, 7 di esse per registrazioni pluviometriche e di temperatura, le rimanenti 2 per misure pluviometriche e idrometriche. Le misure di portata sono ricavate dalle letture idrometriche del Servizio Idrografico di Roma effettuate alla sezione di chiusura posta a valle della diga di San Giovanni. La stima delle temperature è ottenuta mediante i valori rilevati alla stazione di Subiacco-Scolastica (534 m s.l.m.). Nel periodo oggetto di studio compreso tra 1 Gennaio 2006 e 31 Dicembre 2010 la precipitazione media è stata di 1200 mm/anno e la portata media alla sezione di chiusura di 13.5 m³/s.

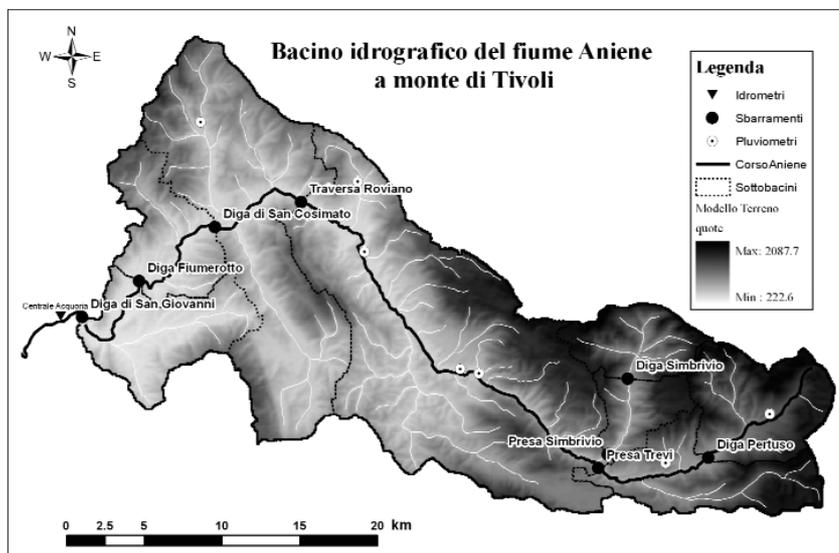


Figura 1 - Bacino del Fiume Aniene ed individuazioni dei principali bacini idroelettrici presenti e le stazioni di monitoraggio.

3. APPROCCIO METODOLOGICO

La modellazione è svolta mediante il modello idrologico AD2 (Fiorentino & Manfreda, 2004; Rosano et al., 2008; Manfreda et al., 2012), che è un modello di tipo concettuale a parametri concentrati fisicamente basati. L'AD2 è stato rielaborato con l'obiettivo di giungere ad una versione di modello in grado di fornire una previsione delle disponibilità idriche in tutte le fasi idrologiche, incluse le magre. Per le finalità del presente lavoro particolare enfasi è stata posta alla descrizione delle portate di base e della componente legata allo scioglimento nivale.

Le portate superficiali e ipodermiche vengono simulate per mezzo di uno schema di vaso lineare, mentre il deflusso di base viene calcolato direttamente dalla serie dei dati di portata registrata mediante un filtro appositamente sviluppato. Questo assunto è necessario a causa delle incongruenze spesso esistenti nel bilancio idrologico a scala di bacino dovute ai numerosi prelievi idrici per scopi civili ed industriali non monitorati.

Un aspetto innovativo del presente lavoro riguarda la calibrazione del modulo nivale che si è svolta in modo indipendente dalla calibrazione del modello consentendo di ottenere una stima fisicamente consistente dei parametri. Il modulo neve sviluppato, infatti, può essere testato con misure di copertura nivale effettuate da satellite indipendentemente dal modulo di ruscellamento. Infatti, in molti casi la calibrazione dei modelli avviene modificando indistintamente i parametri di un modello ed utilizzando come per la calibrazione le sole portate in alveo. Questo inevitabilmente porta ad avere un set di parametri che riproduce correttamente il segnale integrato del bacino, ma non è detto che lo faccia riproducendo correttamente i fenomeni (Kirchner, 2006). Pertanto, in questi casi è probabile che le performance dei modelli non siano altrettanto soddisfacenti in periodi diversi da quelli della calibrazione. Coerentemente a quanto appena detto, i parametri responsabili della generazione del deflusso superficiale ed ipodermico del modello AD2 sono stati calibrati utilizzando la serie dei deflussi superficiali ottenuta depurando la serie delle portate registrate dai deflussi di base stimati.

Ai fini della previsione a due o tre giorni, considerando il fatto che i tempi di variazione del deflusso di base sono certamente superiori, questa componente del deflusso viene assunta costante nei giorni di previsione e valutata sulla base del deflusso osservato nei giorni precedenti.

3.1 Lo scioglimento nivale

Il modulo per lo scioglimento nivale schematizza il manto nevoso attraverso l'equivalente in acqua (SWE) calcolato su tre porzioni del bacino idrografico: porzione coperta da neve a temperature inferiori al punto di scioglimento, porzione coperta da neve in fase di scioglimento e porzione priva di copertura nevosa (si veda Fig. 1). Queste porzioni del bacino hanno dimensioni variabili nel tempo in relazione alla distribuzione spaziale delle temperature che viene dedotta mediante la curva ipsografica del bacino.

A tale scopo si adotta l'approssimazione matematica della curva ipsometrica proposta da Strahler (1952):

$$\frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} = \frac{f_c(t)}{1 + \gamma(1 - f_c(t))} \quad (1)$$

dove z rappresenta la generica quota all'interno del bacino, f_c è la porzione di bacino al di sotto di z , z_{\min} è la quota mi-

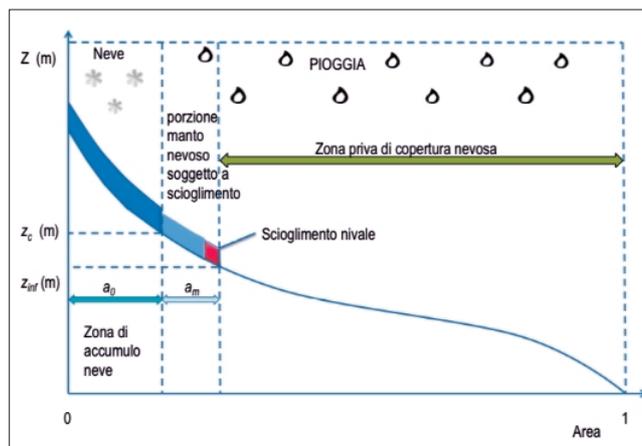


Figura 2 - Schematizzazione delle caratteristiche principali del modulo neve.

nima e z_{\max} è la massima del bacino, mentre g indica il parametro caratteristico della funzione. Questa equazione consente di sviluppare un modello a parametri concentrati in grado di descrivere l'eterogeneità spaziale di un bacino idrografico. La calibrazione del parametro γ è stata effettuata attraverso il DEM del bacino studiato ottenendo $\gamma=2.6$.

Assumendo una dipendenza lineare tra temperature e quota è possibile stimare la distribuzione delle temperature del bacino nota la temperatura in un generico punto a quota z_s (quota della stazione di monitoraggio). In tal modo è possibile identificare la quota di riferimento (z_0) corrispondente ad una temperatura T_b che segna la transizione tra la zona di accumulo neve e la zona in cui la neve è soggetta a scioglimento. Utilizzando un gradiente termico $lr = -6.5$ °C/km, a partire dalla quota della stazione di rilevamento delle temperature è possibile stimare

$$z_0 = z_s + (T_s - T_b)/lr \quad (2)$$

dove T_s è la temperatura rilevata (°C) in corrispondenza della stazione di misura.

Mediante l'eq. 1 è possibile, nota z_0 , definire l'area del bacino che si trova al di sopra di essa (a_0) dove le temperature sono minori di T_b . La temperatura T_b viene utilizzata come livello di transizione tra pioggia liquida e nevosa, come soglia inferiore per lo scioglimento e superiore per il ricongelamento, per cui la curva di livello z_0 diviene il confine tra due regioni: una in cui si realizza l'accumulo e/o il ricongelamento nivale (zona fredda dove $T < T_b$) e l'altra in cui si realizza lo scioglimento nivale (dove le temperature sono maggiori di T_b). Il contenuto equivalente d'acqua al di sopra di z_0 viene denominata SWE_0 , la componente al di sotto di z_0 è invece indicata con SWE_m . La porzione del manto nevoso a temperature superiori a T_b ha dimensioni che dipendono dall'evoluzione delle temperature e tende a contrarsi con l'aumento delle stesse. Questo meccanismo è garantito dal fatto che nel modello l'eventuale scioglimento riduce l'estensione dell'area coperta da neve e non l'altezza di neve accumulata.

Questo approccio consente di simulare l'evoluzione del manto nevoso nel tempo con un modello versatile ed allo stesso tempo in grado di descrivere le dinamiche spaziali della neve che possono essere eventualmente confrontate con misure di copertura nevosa facilmente reperibili mediante sensori satellitari.

Il modulo è basato sul metodo gradi-giorno e stima il bilancio nivale su due bucket di dimensione variabile in base alle fluttuazioni delle temperature. Ciascuno di questi è caratterizzato dalla temperatura media presente nell'area di riferimento. In particolare, le temperature medie relative alle due componenti SWE_0 e SWE_m sono calcolate in funzione delle quote della porzione di bacino considerato. Tale quota z_m può essere calcolata mediante l'eq. 1 integrata in funzione di f_c (porzione di bacino al di sotto della quota z) utilizzando come limiti di integrazioni gli estremi della fascia altimetrica considerata ($f_{c2} - f_{c1}$). L'espressione generale assume la seguente forma

$$z_m = \frac{\int_{f_{c1}}^{f_{c2}} \left(\frac{f_c \cdot (z_{max} - z_{min})}{1 + \gamma(1 - f_c)} + z_{min} \right) df_c}{f_{c2} - f_{c1}} = \frac{(z_{max} + (\gamma - 1)z_{min})}{\gamma} + \frac{(1 + \gamma)(z_{max} - z_{min}) \left(\text{Log}[(f_{c1} - 1)\gamma - 1] - \text{Log}[(f_{c2} - 1)\gamma - 1] \right)}{(f_{c1} - f_{c2})\gamma^2} \quad (3)$$

dove f_{c1} e f_{c2} sono i limiti dell'area di riferimento in termini di frazione di bacino con temperature inferiore ad un dato valore.

Nota z_m è possibile stimare la temperatura media dell'area nella porzione di bacino in cui la neve è in scioglimento come

$$T_m = T_b - lr \cdot (z_0 - z_m) \quad (4)$$

Definite le porzioni di bacino nelle diverse condizioni in funzione della distribuzione delle temperature è possibile applicare il bilancio nivale basato sul metodo gradi-giorno. La prima fascia (detta fredda) è identificata in base alla posizione T_b , mentre la seconda inizia in corrispondenza della quota in cui si riscontra T_b e si chiude in corrispondenza della quota, z_{inf} , entro cui il manto nevoso viene contenuto in funzione delle fasi di bilancio. Lo scioglimento nivale è pensato come una riduzione dell'estensione di questa fascia piuttosto che una riduzione di altezza nevosa sull'intera fascia. La restante parte di bacino è invece libera da neve e segue un bilancio idrologico ordinario.

L'aliquota di passaggio dalla fase solida a quella liquida si calcola facendo riferimento al metodo dei gradi-giorno definito su una temperatura oraria:

$$r_s = M_f \cdot (T_m - T_b) \cdot a_m \quad (5)$$

dove M_f è il fattore di scioglimento espresso in $mm/^\circ C$, a_m è l'area del bacino dove si ha della neve soggetta a scioglimento (mm^2).

Nel modello, comunque, si assume che il fenomeno di scioglimento della neve e del successivo deflusso a valle non avvenga in maniera istantanea al cambio di temperatura ma in modo graduale, cercando così di simulare più fedelmente le fasi reali del fenomeno. In particolare, la quantità di liquido prodotto dallo scioglimento non defluisce istantaneamente ma si somma a Nt_m che è il contenuto d'acqua nella neve SWE_m ; solo quando Nt_m supera il valore soglia pari al contenuto massimo N_{max} assunto pari 5% di SWE_m allora la quantità eccedente si trasforma in deflusso da scioglimento nivale.

Il valore del contenuto d'acqua della zona in scioglimento è aggiornato mediante la seguente:

$$Nt_m = \min(Nt_m + r_s, N_{max}) \quad (6)$$

L'effettivo deflusso da scioglimento nivale al tempo t è generato solo al superamento della capacità di accumulo presente nel manto nevoso ed espresso da N_{max} .

Per effetto del passaggio di stato da solido a liquido, l'area della seconda fascia occupata dalla neve si riduce provocando una riduzione dell'area pari a:

$$a_{inf} = \frac{(SWE_m - r_s)}{SWE_m / a_m} \quad (7)$$

Nel procedimento di simulazione dei processi sopra descritti, siccome la schematizzazione suddivide il bacino idrografico in tre porzioni di dimensioni variabile nel tempo, le quantità del contenuto equivalente d'acqua, SWE, della neve e del suo contenuto d'acqua, Nt , per le due zone varia nel tempo. La variazione di queste quantità è effettuata rispettando la conservazione di massa ed assumendo, secondo lo schema a parametri concentrati, uno spessore costante di neve in ciascun'area.

Il contenuto d'acqua Nt_m della zona in scioglimento rappresenta l'elemento che genera scioglimento nivale, mentre il contenuto d'acqua Nt_0 nella zona di accumulo neve viene ridotto nel tempo per via del fenomeno di ricongelamento secondo l'espressione:

$$RFR = \min(Nt_0, M_{fr} \cdot (T_b - T_0) \cdot a_0) \quad (8)$$

con M_{fr} fattore di congelamento espresso in $mm/^\circ C$, T_0 temperatura media nella zona di accumulo neve e a_0 la percentuale di area di snowpack a temperature inferiori a T_b . Il valore di RFR si detrae dall'altezza Nt_0 e si aggiunge al termine SWE_0 .

Il modulo è stato calibrato attraverso solo tre parametri, ovvero gli indici M_f e M_{fr} , ed il valore della temperatura di soglia T_b . I restanti parametri sono stati assegnati sulla base di informazioni di letteratura (lr e N_{max}), mentre i valori di z_{min} , z_{max} ed γ sono dedotti dalla curva ipsografica calcolata tramite il DEM. La calibrazione del modulo neve può essere realizzata confrontando sia graficamente che numericamente i valori di area coperta da neve rilevata dai due satelliti della NASA Aqua e Terra dotati di sensore Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibili sul sito <http://nsidc.org/daac/>. Rielaborando in ambiente GIS i dati di diversi giorni e confrontati con i risultati delle medesime aree derivanti dall'applicazione del modulo di calcolo, è possibile scegliere il set ottimale di valori di M_{fr} , M_f , e T_b .

3.2 Stima delle portate di base

Le portate di base sono stimate tramite interpolazione, mediante spline di cubiche, effettuata sulla serie dei valori minimi registrati ed identificati mediante la funzione "findpeaks" di Matlab. È opportuno sottolineare che, a causa delle fluttuazioni indotte durante la giornata dalle operazioni di modulazione degli impianti idroelettrici, nel presente studio, si è scelto di lavorare sulla serie di portate aggregate a scala giornaliera per eliminare tale segnale. I risultati dell'applicazione del filtro sono riportati in Fig. 3.

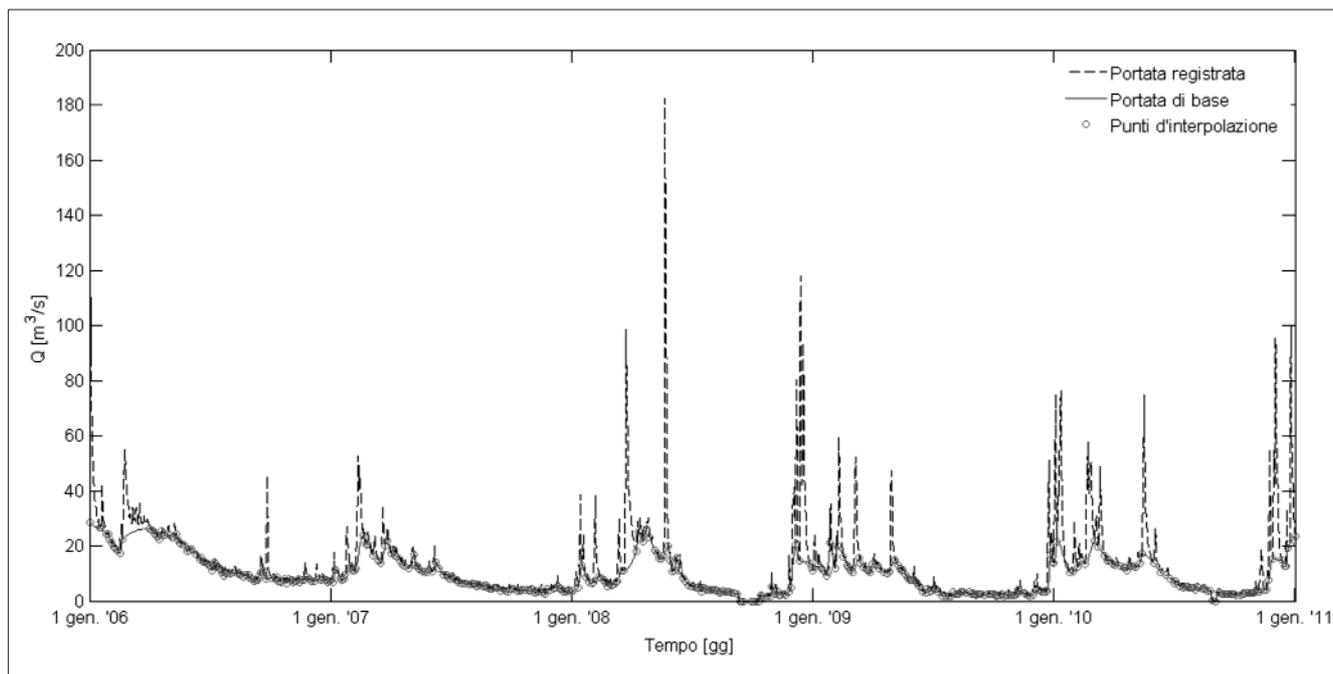


Figura 3 - Idrogramma delle portate relativo al periodo gennaio 2006 - dicembre 2010 e andamento della componente di base delle portate ottenuta con interpolazione mediante spline di cubiche.

Questa metodologia di valutazione della componente di base è utilissima in fase di calibrazione del modello. In fase di previsione invece, è possibile avere a disposizione solo i valori di deflusso relativi ai giorni precedenti la previsione effettuata al tempo t , quindi ci si trova nella condizione di dover effettuare un'extrapolazione per tutti i giorni a partire dall'ultimo punto di minimo noto. Tuttavia è possibile vincolare la stima dell'interpolazione ad un valore del deflusso di base dedotto come differenza tra deflusso registrato e ruscellamento superficiale simulato al giorno t -esimo. In tal modo, è possibile eseguire delle stime attendibili del deflusso di base nei giorni successivi al tempo t e quindi in previsione.

Questa modalità di valutazione del deflusso di base presuppone la disponibilità di registrazioni di portata alla sezione di interesse. Per i casi in cui è presente uno sbarramento fluviale, i valori di portata in arrivo possono essere dedotti dai dati di bilancio al lago, mentre gli impianti ad acqua fluente si ha la necessità di una installazione a monte della presa per le misure di portata.

Se questo da un lato è un vincolo per l'applicazione della metodologia, dall'altro consente di superare le numerose difficoltà che s'incontrerebbero qualora si volesse effettuare un bilancio monte idrologico completo in un bacino in cui sono presenti numerose opere idrauliche che effettuano accumuli e derivazioni difficilmente quantificabili. Invece la misura diretta del deflusso in alveo associata al fatto che la variazione della componente sotterranea è un fenomeno lento rispetto all'orizzonte temporale di 2-3 giorni di previsione, consente di superare efficacemente queste difficoltà.

4. CALIBRAZIONE, VALIDAZIONE E DISCUSSIONE

La calibrazione ha riguardato separatamente i parametri delle componenti superficiali e quelli del modulo neve. Per calibrare i parametri del modulo neve sono state utilizzate le stime di copertura nevosa messe a disposizione dal National Snow & Ice Data Center (NSIDC) ed ottenute

mediante l'algoritmo di *Salomonson e Appel* (2004). L'NSIDC database fornisce mappe di copertura nevosa e nuvolosa che possono essere messe a confronto con la percentuale di area coperta da neve ottenuta dal modulo neve descritto nei paragrafi precedenti. In *Fig. 4* si riportano i valori di area coperta da neve relativi al periodo di calibrazione. L'area calcolata è rappresentata insieme a due grandezze telerilevate: la copertura nevosa stimata eliminando i pixel con nuvole (limite inferiore) e un'altra data dalla somma tra questa e l'area occupata da nuvole (limite superiore). Si riportano le due informazioni perché ovviamente l'area coperta da neve è certamente un valore compreso tra questi due valori, considerato che la copertura nuvolosa potrebbe mascherare una porzione di copertura nevosa. I valori calibrati dei parametri del modulo neve sono i seguenti: $M_{fr} = 0.01 \text{ mm/}^\circ\text{C}$, $M_f = 0.15 \text{ mm/}^\circ\text{C}$, $T_b = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. La calibrazione è effettuata imponendo che i valori simulati di area coperta dalla neve rientrasse entro i due limiti suddetti. I dati rilevati ovviamente non sono continui a causa della copertura nuvolosa che durante alcuni giorni dell'anno può essere eccessiva.

La calibrazione dei parametri responsabili del ruscellamento superficiale è stata svolta utilizzando la serie dei soli deflussi superficiali dedotti a valle della procedura di filtro precedentemente descritta. La calibrazione è stata condotta utilizzando i primi due anni di dati (1/01/2006 - 31/12/2007), mentre la validazione ha interessato il periodo 1/01/2008 - 31/12/2010.

In particolare la calibrazione dei parametri riguardanti i tempi di ritardo del deflusso quali la costante di invaso del deflusso superficiale e quella del deflusso sub-superficiale è stata effettuata individuando, nel periodo di calibrazione, i più significativi eventi di piena e ricercando i parametri che consentissero di simulare in maniera ottimale gli idrogrammi registrati.

Valutati i primi due, per quanto riguarda invece i parametri del modello che descrivono il bilancio idrico del suolo,

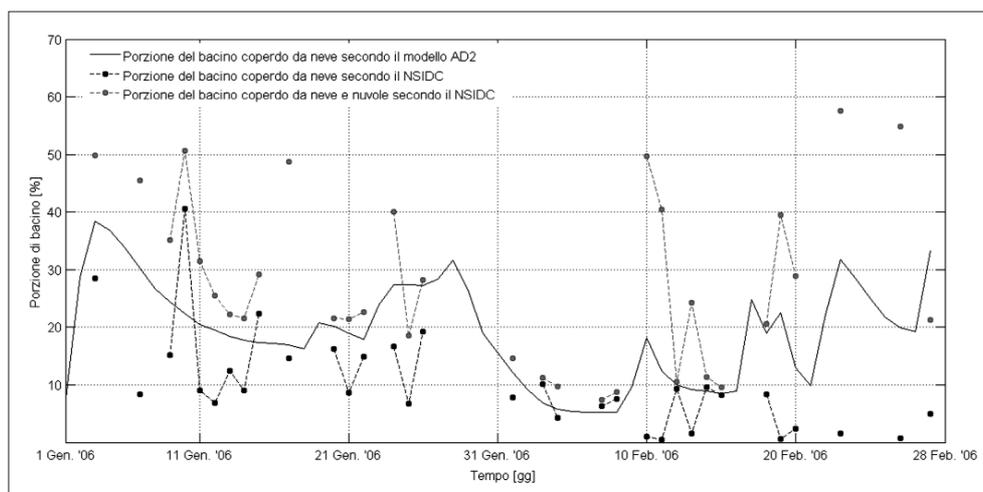


Figura 4 - Area simulata con copertura nevosa confrontata con i valori di copertura nevosa e nuvolosa telerilevati da MODIS durante il periodo gennaio-febbraio 2006.

si è proceduto per tentativi facendoli variare nell'ambito di range che tengono conto dei dati di letteratura in funzione delle caratteristiche medie del suolo del bacino in esame Cosby et al. (1984).

L'intero periodo considerato è descritto in Fig. 5, dove sono riportate le portate in alveo simulate e registrate. Il grafico conferma l'ottimo adattamento delle portate previste da AD2 rispetto ai valori registrati sia nel periodo di calibrazione sia in quello di validazione.

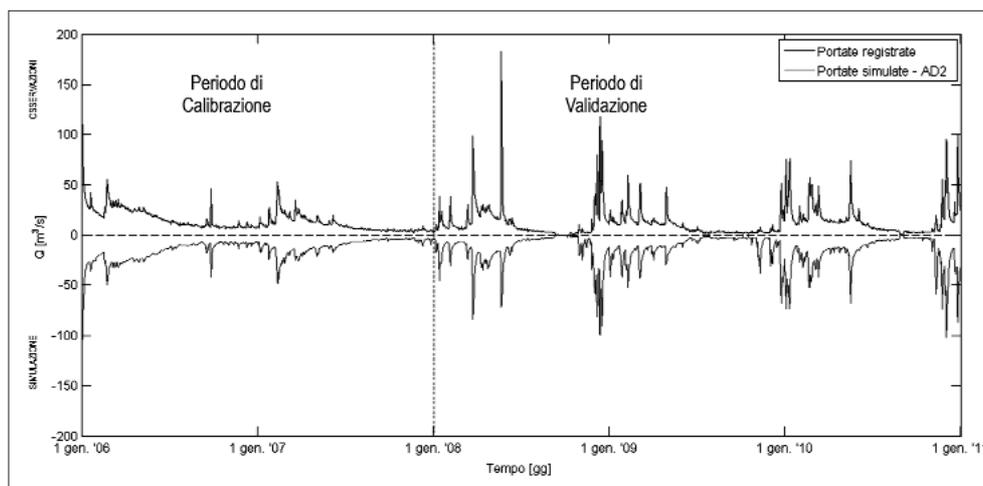


Figura 5 - Grafico a specchio delle portate osservate e portate calcolate da AD2 relative al periodo 1/1/2006 - 31/12/2010 (Fiume Aniene a San Giovanni).

4.1 La previsione idrologica

I modelli di tipo meteorologico si possono distinguere secondo due categorie: modelli globali (GM = Global Model), che prendono in considerazione tutta l'atmosfera terrestre, e modelli ad area limitata (LAM = Limited Area Model), che lavorano su parti più ristrette di territorio. I GM operano con risoluzioni comprese tra 40 e 100 km in orizzontale, mentre i LAM impiegano una griglia più fine, con passo di 5÷20 km, su un'area ristretta e sfruttano le condizioni iniziali e al contorno definite dai GM. I GM producono previsioni anche su orizzonti temporali lunghi, mentre si utilizzano i LAM per avere previsioni più dettagliate su aree ristrette. È prassi comune far girare i LAM solo per tempi limitati, generalmente non si superano le 72 ore. Ciò non è semplicemente legato ai tempi di calcolo, ma è dovuto al

fatto che i LAM, necessitano delle condizioni al contorno definite dai GM.

Esempi di modelli globali sono quello del ECMWF (Centro Europeo di Previsione a Medio Termine di Reading), GFS della NOAA-Washington, DWD del Servizio Meteorologico Tedesco. Esempi di modelli ad Area Limitata che fanno previsioni su tutta l'Italia ad alta risoluzione (5, 7 km di passo), sono il COSMO-LAMI (gestito dall'Arpa Piemonte e dall'Arpa Emilia Romagna congiuntamente al CNMCA dell'Aeronautica Militare nell'ambito del progetto di

collaborazione internazionale COSMO), il BOLAM del CNR-ISAC di Bologna, il MM5 di CETEMPS-Regione Abruzzo. I LAM sono quelli che lavorano ad una scala più vicina ai modelli idrologici.

Nel presente lavoro, sono state utilizzate le previsioni meteorologiche del modello COSMO-LAMI quali in input al modello idrologico. Questo modello fornisce ogni giorno le previsioni di precipitazione e di temperatura dalle ore 0.0 UTC e per le successive 72 ore su una griglia di circa 7 km.

Le previsioni sono state tratte dall'archivio del gruppo di Meteorologia di RSE. La scansione temporale delle previsioni è di 3 ore e per le finalità di questo lavoro, si è preferito lavorare con tale scansione temporale piuttosto che effettuare una successiva disaggregazione a scale temporali inferiori. Questo comporta un certo smorzamento dei picchi di precipitazione e quindi delle portate.

Le simulazioni con piogge previste dal modello COSMO-LAMI sono state svolte utilizzando come condizione iniziale quella ottenuta effettuando preventivamente

una simulazione idrologica con piogge registrate fino all'istante di previsione. In modalità previsione ogni giorno è associata una simulazione sui dati di pioggia prevista dal COSMO-LAMI nelle successive 24, 48 e 72 ore. I risultati sono presentati nella Fig. 6.

Le prestazioni del modello sono state valutate attraverso l'errore quadratico medio (Root Mean Square Error - RMSE), l'errore medio assoluto (MAE), l'errore medio assoluto percentuale (MAPE), il coefficiente di efficienza (NSE) di Nash e Sutcliffe (1970) e l'errore relativo nella stima del deflusso totale (RVE). Nella Tab. 1 sono riportati i valori di questi indici di prestazione valutati sulle previsioni a passo giornaliero con 1, 2 e 3 giorni di anticipo e per l'applicazione con precipitazioni registrate relativamente al periodo di 5 anni 2006-2010. Le simulazioni riportate in Fig. 6 e sinte-

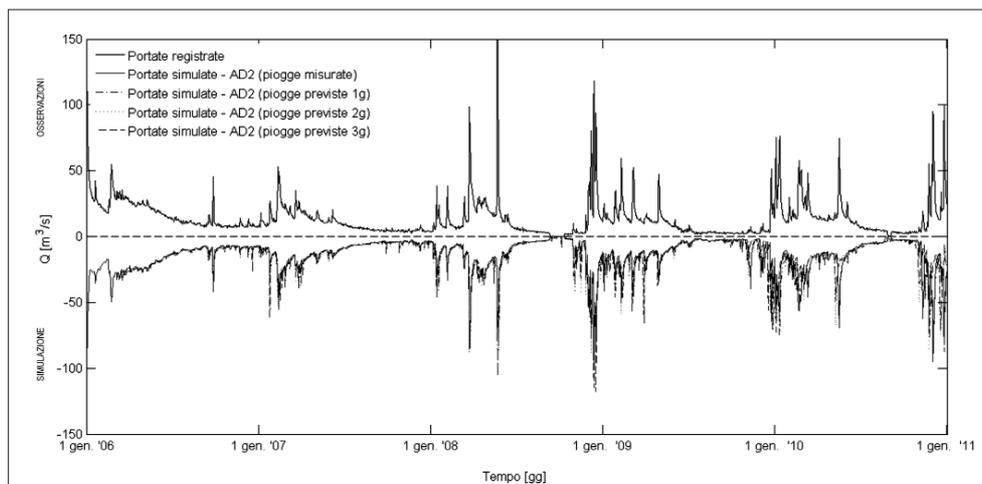


Figura 6 - Grafico a specchio di confronto tra portate osservate e simulate mediante modello AD2 utilizzando precipitazioni misurate da pluviometri e simulate da modello COSMO-LAMI con 1, 2 e 3 giorni di anticipo.

tizzate in termini di prestazioni nella Tab. 1 mostrano nel complesso un buon adattamento ai dati di portata registrati. Le prestazioni del modello idrologico applicato utilizzando dati di pioggia previsti piuttosto che registrati peggiorano con l'aumentare del tempo di preannuncio utilizzato. È interessante notare che le prestazioni di un modello idrologico applicato con i soli dati registrati e la versione che utilizza 24 ore di dati previsti da modello COSMO-LAMI sono molto simili tra loro. Si osserva solo un piccolo incremento degli errori nel caso della previsione a 24ore. La riduzione di precisione delle previsioni è certamente più marcata passando dalle previsioni a 1 giorno a quelle a 2 e 3 giorni, questo verosimilmente è dovuto sia al fatto che nella previsione del primo giorno si risente ancora dell'influenza della condizione iniziale calcolata con le precipitazioni osservate sia al fatto che le previsioni del modello LAMI con 1 giorno di preavviso sono più affidabili rispetto a quelle a 2 e 3 giorni. Dal secondo giorno in avanti, superato il tempo di corrvazione del bacino, che è inferiore ad un giorno, l'incertezza delle previsioni meteorologiche diventa relativamente più importante ed influenza maggiormente i risultati. Si fa presente che le portate osservate contengono delle fluttuazioni artificiali dovute alle modulazioni delle centrali idroelettriche che non sono simulate dal modello idrologico. Queste fluttuazioni sono trascurabili alla scala giornaliera, in quanto gli impianti in esercizio nel bacino effettuano un compenso giornaliero. Per tale ragione si è preferito svolgere le valutazioni sulle prestazioni delle simulazioni alla sola scala giornaliera.

Per quanto riguarda la previsione a passo orario occorre tener presente che il modello idrologico, in caso di deflusso alterato da attività antropiche a monte, produce previsioni ottimali anche alla risoluzione temporale oraria solo nei pe-

riodi con deflusso abbondante, cioè quando l'effetto antropico è trascurabile in quanto nel corso d'acqua scorre una portata più prossima a quella naturale.

Negli altri casi, per prevedere le fluttuazioni orarie del deflusso occorre conoscere e simulare in modo deterministico le operazioni di regolazione effettuate a monte, oppure, nel caso in cui tali regolazioni sono incognite, è possibile realizzare un filtro statistico identificato sui dati storici. A tal scopo, Castelletti e Pianosi (2012) in collaborazione con RSE hanno sviluppato un filtro statistico in grado di riprodurre queste

fluttuazioni sulla base di misure di precipitazione e portata raccolte nelle ore precedenti all'istante di previsione. Un esempio di tale applicazione è riportato nella Fig. 7, in cui si può notare come la previsione del modello idrologico accoppiata al filtro consenta la descrizione delle portate orarie anche in quei periodi in cui le fluttuazioni antropiche sono più significative.

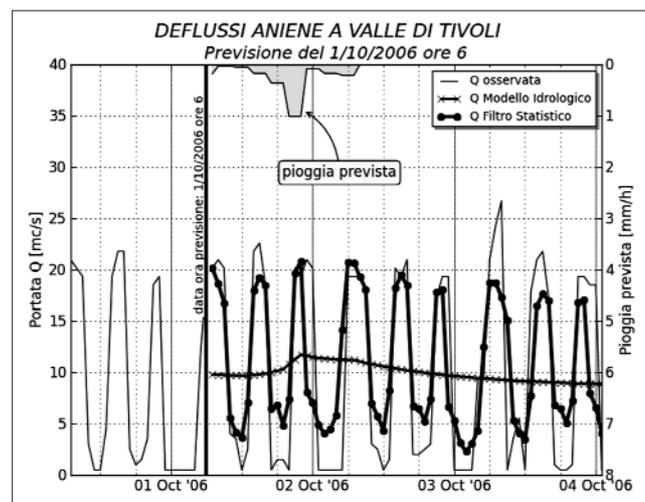


Figura 7 - Esempio di previsione in periodo secco nel quale la previsione del modello idrologico (linea con simbolo x) è stata corretta utilizzando un filtro statistico. Il filtro, sulla base delle osservazioni del giorno precedente (linea continua a sinistra della data ed ora di previsione), fa sì che la nuova previsione a passo orario (linea continua con pallini) sia molto più vicina a quanto successivamente è stato osservato (linea continua a destra della data ora di previsione).

TABELLA 1 - Prestazione del modello AD2 basato su precipitazioni misurate da pluviometri e simulate da modello COSMO-LAMI con 1, 2 e 3 giorni di anticipo

Indice	Risultati ottenuti con piogge osservate	Risultati ottenuti con previsione a 1 giorno	Risultati ottenuti con previsione a 2 giorni	Risultati ottenuti con previsione a 3 giorni
RMSE (m ³ /s)	4.41	4.92	6.20	6.35
MAPE (%)	17.78	18.80	23.12	25.44
MAE (m ³ /s)	1.81	1.90	2.48	2.71
NSE (%)	89.67	86.04	77.82	76.67
RVE (%)	3.62	6.44	6.97	7.61

L'esempio si riferisce ad una situazione di magra, nel quale il deflusso naturale è fortemente alterato artificialmente. Il modello idrologico riesce a prevedere il volume giornaliero atteso ma non l'andamento orario delle portate e tuttavia, grazie al fatto che esiste una correlazione fra il comportamento dei giorni precedenti con quello dei giorni successivi, è possibile costruire un modello statistico in grado di effettuare le necessarie correzioni al risultato del modello idrologico e avvicinare notevolmente la previsione a quanto poi osservato.

Anche per questo modello statistico è fondamentale avere a disposizione i dati dei deflussi osservati nel punto in cui è richiesta la previsione. Il modello statistico, infatti, effettua una prima classificazione dello stato idrologico attuale e futuro sulla base di valori soglia della portata attualmente osservata e della precipitazione prevista. Le successive valutazioni sono differenti in funzione di questo stato. Le correzioni da apportare alla previsione fornita dal modello idrologico sono quindi calcolate sulla base dell'errore di previsione osservato nelle diverse ore dei giorni precedenti.

I valori soglia ed i parametri del modello statistico sono stimati sulla base dei dati storici: maggiore è la lunghezza temporale dei dati storici pregressi disponibili e naturalmente maggiore è l'affidabilità del modello.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro descrive i risultati di un'attività di ricerca volta a definire nuovi strumenti per migliorare la gestione i sistemi di produzione energetica. L'approccio modelli-

stico utilizzato in questa fase del lavoro ha consentito di fornire previsioni di tipo deterministico delle portate, evidenziando le criticità in termini d'incertezza delle previsioni specie a 2 e 3 giorni. Il lavoro svolto in questa fase è stato mirato prevalentemente a migliorare il modello idrologico AD2 e sviluppare una procedura di calibrazione per tale strumento. Le analisi mostrano le enormi potenzialità che questi strumenti forniscono per ottimizzare lo sfruttamento degli impianti idroelettrici esistenti.

Il sistema si caratterizza per la parsimonia dei dati di input richiesti che sono solo precipitazioni e temperature nel bacino a monte, le quali sono più comunemente disponibili, ed osservazioni di portata nel solo punto di interesse.

I risultati ottenuti mostrano che è possibile calibrare in maniera affidabile il sistema nel punto di interesse ed ottenere buoni risultati in termini di portata media giornaliera in tutte le condizioni idrologiche. Il sistema produce buoni risultati anche in termini di portata oraria nei periodi di deflusso abbondante, mentre in periodi di magra, qualora sia notevole l'alterazione antropica a monte, occorre effettuare ulteriori elaborazioni mediante il ricorso a filtri statistici per migliorare la previsione.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Programma tra RSE (ex ERSE) ed il Ministero dello Sviluppo Economico - D.G.E.R.M. stipulato in data 29 luglio 2009 in ottemperanza del DM, 19 marzo 2009. Gli autori ringraziano il Servizio Idrografico di Roma per i dati forniti.

BIBLIOGRAFIA

- Castelletti ?, Pianosi ?.**, Sviluppo e test del modulo previflow sul bacino dell'Aniene, in Mancusi L. "Sviluppo e applicazioni del sistema SW HALTFLOOD", Rapporto 12000345, RSE spa, 2012, pp. 74.
- Cosby B. J., Hornberger G. M., Papp R. B., Ginn T. R.**, A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils, *Water Resources Research*, 20, 1984, pp. 682-690.
- Ferraris L., Rudari R., Siccardi F.**, The uncertainty in the prediction of flash floods in the northern Mediterranean environment, *Journal of Hydrometeorology*, 2002.
- Fiorentino M., Manfreda S.**, La stima dei volumi di piena dell'Adige a Trento con riferimento al rischio di inondazione, *XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 2004.
- Kirchner J. W.**, Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, *Water Resources Research*, 42, W03S04, 2006.
- Manfreda S., Funicelli L., Mancusi L.**, Previsione idrologica per la gestione degli impianti idroelettrici, *Atti del Convegno di idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Brescia, 2012.
- Montanino G., Benedetti L., Morelli S., Racchetti A.**, Lo sviluppo delle rinnovabili nel settore elettrico verso il traguardo del 2020 (The RES-E development in Italy: Towards the 2020 target), *Economia delle fonti di energia e dell'ambiente*, N. 1, 2010, pp. 31-48.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V.**, River flow forecasting through conceptual models, Part 1 - a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 1970, pp. 282-290.
- Rosano R., Manfreda S., Fiorentino M., Sole A.**, Sviluppo ed ingegnerizzazione di un modello per la simulazione idrologica a scala di bacino, *XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 2008.
- Salomonson V. V., Appel I.**, Estimating the fractional snow covering using the normalized difference snow index, *Remote Sensing of Environment*, 89, 2004, pp. 351-360.
- Strahler A. N.**, Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Bulletin Geological Society of America*, 63, 1952, pp. 1117-1142.
- Terna**, *Dati Statistici sull'energia elettrica in Italia: dati Generali*, 2010, p. 21.